

MODULARIO
L.C.A. - 101



EXPRESS MAIL NO. EV064988600US

Mod. C.E. - 1-4-7

4 4

Ministero delle Attività Produttive
Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività
Ufficio Italiano Brevetti e Marchi
Ufficio G2

Autenticazione di copia di documenti relativi alla domanda di brevetto per:

Invenzione Industriale

TO2001 A 000157



*Si dichiara che l'unita' copia è conforme ai documenti originali
depositati con la domanda di brevetto sopraspecificata, i cui dati
risultano dall'accluso processo verbale di deposito.*

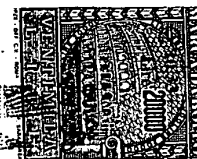
Roma, li

28 FEB. 2002

IL DIRIGENTE

Elena Marinelli

■ Elena Marinelli



AL MINISTERO DELL'INDUSTRIA DEL COMMERCIO E DELL'ARTIGIANATO
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI - ROMA

MODULO A

DOMANDA DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE, DEPOSITO RISERVE, ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO

A. RICHIEDENTE (I) STMICROELECTRONICS S.R.L.

1) Denominazione AGRATE BRIANZA (MI) codice 00951900968

Residenza _____

2) Denominazione _____

Residenza _____

B. RAPPRESENTANTE DEL RICHIEDENTE PRESSO L'U.I.B.M.

cognome e nome JORIO Paolo e altri cod. fiscale _____

denominazione studio di appartenenza STUDIO TORTA S.r.l.

via Viotti n. 0009 città TORINO cap 10121 (prov) TO

C. DOMICILIO ELETTIVO destinatario

via _____ n. _____ città _____ cap _____ (prov) _____

D. TITOLO

classe proposta (sez/ci/ec) _____ gruppo/sottogruppo _____

METODO E CIRCUITO DI RILEVAMENTO DI SPOSTAMENTI TRAMITE SENSORI
MICRO-ELETTRO-MECCANICI CON COMPENSAZIONE DI CAPACITA' PARASSITE E DI
MOVIMENTI SPURI.

ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO: SÌ ☐ NO ☐

SE ISTANZA: DATA _____ N° PROTOCOLLO _____

E. INVENTORI DESIGNATI

cognome nome

1) LASALANDRA Ernesto 3) BASCHIROTTI Andrea

2) UNGARETTI Tommaso 4) _____

F. PRIORITÀ

nazione o organizzazione

tipo di priorità

numero di domanda

data di deposito

allegato S/R

1) _____

2) _____

SCHIOLIMENTO RISERVE

Data N° Protocollo

G. CENTRO ABILITATO DI RACCOLTA COLTURE DI MICROORGANISMI, denominazione

H. ANNOTAZIONI SPECIALI

Per la migliore comprensione dell'invenzione è stato necessario
depositare disegni con diciture come convenuto dalla Convenzione
Europea sulle formalità alle quali l'Italia ha aderito.

DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

N. es.

Doc. 1) ☒ PROV n. pag. 127 riassunto con disegno principale, descrizione e rivendicazioni (obbligatorio 1 esemplare) _____

Doc. 2) ☒ PROV n. tav. 104 disegno (obbligatorio se citato in descrizione, 1 esemplare) _____

Doc. 3) ☒ RIS lettera d'incarico, procura o riferimento procura generale _____

Doc. 4) ☒ RIS designazione inventore _____

Doc. 5) ☐ RIS documenti di priorità con traduzione in italiano _____

Doc. 6) ☐ RIS autorizzazione o atto di cessione _____

Doc. 7) ☐ nominativo completo del richiedente _____

8) attestati di versamento, totale lire Cinquecentosessantacinquemila= - ☒ obbligatorio

COMPLETO IL 21 02 2001 FIRMA DEL (I) RICHIEDENTE (I) JORIO Paolo

CONTINUA SUO NO

DEL PRESENTE ATTO SI RICHIEDE COPIA AUTENTICA SINO SI

CAMERA DI COMMERCIO IND. ART. AGR. DI TORINO codice 01

VERBALE DI DEPOSITO NUMERO DI DOMANDA TO 2001A 000157

L'anno millenovecento duemilauno il giorno ventuno del mese di Febbraio

il (I) richiedente (I) soprindicato (I) ha (hanno) presentato a me sottoscritto la presente domanda, corredata di n. _____ fogli aggiuntivi per la concessione del brevetto soprariportato.

I. ANNOTAZIONI VARIE DELL'UFFICIO ROGANTE

R. DEPOSITANTE
STUDIO TORTA s.r.l.



Libane Bruno

RIASSUNTO INVENZIONE CON DISEGNO PRINCIPALE

NUMERO DOMANDA TO 2001A 000157

NUMERO BREVETTO

DATA DI DEPOSITO 21/09/2001

DATA DI RILASCIO

A. RICHIEDENTE (I)

Denominazione STMICROELECTRONICS S.R.L.

Residenza AGRATE BRIANZA (MI)

B. TITOLO

METODO E CIRCUITO DI RILEVAMENTO DI SPOSTAMENTI TRAMITE SENSORI

MICRO-ELETTRO-MECCANICI CON COMPENSAZIONE DI CAPACITA' PARASSITE E DI MOVIMENTI SPURI.

Classe proposta (sez./cl./ecf)

(gruppo/sottogruppo)

L. RIASSUNTO

Metodo di rilevamento di spostamenti tramite un sensore micro-elettro-meccanico, avente un corpo fisso (3) ed una massa mobile (4), formanti almeno un primo e un secondo condensatore di lettura (11, 12), collegati a un nodo comune (15) e a un primo, rispettivamente un secondo nodo di lettura (13, 14) e presentanti una capacità di lettura comune (C_s) a riposo ed uno sbilanciamento capacitivo (ΔC_s) a seguito di uno spostamento. Il metodo include le fasi di: fornire al nodo comune (15) una tensione di lettura (V_s) costante di durata prefissata; generare una tensione di retroazione (V_{FB}) per mantenere il primo e il secondo nodo di lettura (13, 14) a una tensione di modo comune costante; generare una grandezza elettrica di compensazione (V_c), inversamente proporzionale alla capacità di lettura comune (C_s) almeno in un prefissato intervallo (I); fornire la grandezza elettrica di compensazione (V_c) al nodo comune (15); e rilevare una grandezza di uscita (V_o) correlata allo sbilanciamento capacitivo (ΔC_s).

M. DISEGNO

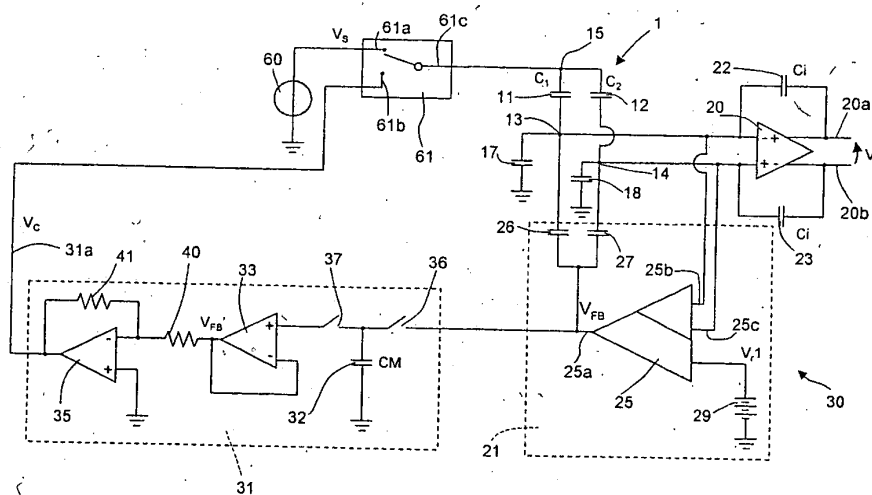


Fig.4



DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale

di STMICROELECTRONICS S.R.L.

di nazionalità italiana,

5 con sede a 20041 AGRATE BRIANZA (MILANO) - VIA C. OLIVETTI, 2

Inventori: LASALANDRA Ernesto, UNGARETTI Tommaso,

BASCHIROTTI Andrea

TO 2001A 000 157

*** **

La presente invenzione si riferisce ad un metodo e
10 a un circuito di rilevamento di spostamenti tramite
sensori micro-elettro-meccanici con compensazione di
capacità parassite e di movimenti spuri.

Come è noto, l'impiego di sensori di tipo micro-
elettro-meccanico, o sensori MEMS (dall'inglese "Micro-
15 Electro-Mechanical System"), a sbilanciamento capacitivo
differenziale è stato proposto per realizzare, ad
esempio, accelerometri lineari o rotazionali e sensori
di pressione.

In particolare, i sensori MEMS del tipo indicato
20 comprendono un corpo fisso (statore) e una massa mobi-
le, generalmente di materiale semiconduttore opportuna-
mente drogato, fra loro collegati mediante elementi
elastici (molle) e vincolati in modo che la massa mobi-
le abbia, rispetto allo statore, gradi di libertà pre-
25 fissati, traslatori e/o rotatori. Inoltre, lo statore e

IOIO Paolo
iscrittione Albo nr 294/BM

la massa mobile presentano una pluralità di bracci fissi e, rispettivamente, mobili, fra loro interdigitati. In pratica, ogni braccio fisso è interposto fra una coppia di bracci mobili, in modo da formare una coppia di condensatori aventi un terminale in comune e capacità dipendente dalla posizione relativa dei bracci stessi, ossia dalla posizione relativa della massa mobile rispetto allo statore. Quando il sensore viene sollecitato, la massa mobile si sposta e si verifica uno sbilanciamento nelle capacità dei condensatori.

A seconda del tipo di struttura e del tipo movimento relativo permesso fra massa mobile e statore, è possibile realizzare sensori MEMS di tipo lineare, rotazionale, a variazione di interspazio (distanza fra ciascun braccio mobile e i rispettivi bracci fissi) e/o a variazione di affaccio (variazione dell'area di reciproco affacciamento fra i bracci mobili e i rispettivi bracci fissi).

In tutti i casi citati, la lettura del sensore (ossia il rilevamento di una grandezza elettrica rappresentativa della variazione di capacità dei condensatori) comporta dei problemi per la presenza di capacità parassite (capacità di "pad" e di substrato).

Per superare tale inconveniente, un metodo e un circuito per la lettura di sensori MEMS sono stati pro-

IORIO Paolo
Inventore Atto n° 294/BMI

posti in "A Three-Axis Micromachined Accelerometer with a CMOS Position-Sense Interface and Digital Offset-Trim Electronics" di M. Lemkin, B. Boser, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 34, N. 4, pagg. 456-468.

5 Nell'articolo citato, in particolare, si fa riferimento a un sensore MEMS 1 di tipo lineare illustrato, per maggiore chiarezza, nelle figure 1 e 2; quanto verrà di seguito esposto, è comunque valido per sensori MEMS di qualsiasi tipo.

10 In dettaglio, il sensore 1 comprende uno statore 2 e un massa mobile 3, fra loro collegati mediante molle 4 in modo che la massa mobile 3 possa traslare parallelamente a un primo asse di riferimento X, mentre è sostanzialmente fissa rispetto a un secondo e a un terzo
15 asse di riferimento Y, Z. Il sensore 1 è inoltre simmetrico rispetto a un asse longitudinale parallelo al primo asse di riferimento X.

20 Lo statore 2 e la massa mobile 3 sono provvisti di una pluralità di primi e secondi bracci fissi 5', 5" e, rispettivamente, di una pluralità di bracci mobili 6, estendentisi sostanzialmente paralleli al piano Y-Z.

25 Come mostrato in dettaglio in figura 2, ogni braccio mobile 6 è compreso fra due rispettivi bracci fissi 5', 5", ai quali è parzialmente affacciato. Di conseguenza, il braccio mobile 6 forma con i due bracci fis-

JORIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BMI

si 5', 5" un primo e, rispettivamente,, un secondo condensatore di lettura 8, 9 a facce piane parallele. In particolare, l'area delle armature dei condensatori di lettura 8, 9 è pari all'area di affaccio A dei bracci mobile 6 e dei bracci fissi 5', 5". In particolare, l'area di affaccio A è sostanzialmente un rettangolo di lati L_y , L_z .

Il primo e il secondo condensatore di lettura 8, 9 hanno una prima e, rispettivamente, una seconda capacità di lettura C_a , C_b , date dalle espressioni:

$$C_a = \epsilon \frac{A}{X_1} \quad (1)$$

$$C_b = \epsilon \frac{A}{X_2} \quad (2)$$

dove X_1 , X_2 sono le distanze fra il braccio mobile 6 e il primo e, rispettivamente, il secondo braccio fissi 5', 5" di figura 2 e ϵ è la costante dielettrica dell'aria.

Nel sensore 1, tutte le capacità di lettura C_a formate fra i bracci mobili 6 e i primi bracci fissi 5' sono fra loro in parallelo; analogamente tutte le capacità di lettura C_b formate fra i bracci mobili 6 e i secondi bracci fissi 5" sono fra loro in parallelo. Di conseguenza, fra lo statore 3 e la massa mobile 4 sono complessivamente presenti due capacità, pari $C_1 = N \cdot C_a$ e, rispettivamente, a $C_2 = N \cdot C_b$, con N numero

JORIO Paolo
 Registrato Albo nr 294/BM



ro di bracci mobili 6 del sensore 1. Definendo come capacità di lettura comune C_s del sensore 1 il valore delle capacità C_1 , C_2 a riposo, si ha:

$$C_s = C_1 = C_2 \quad (3)$$

5 In seguito a un movimento della massa mobile 4 puramente lungo l'asse X, le capacità di lettura C_1 , C_2 presentano variazioni di segno opposto e in valore assoluto uguali e pari a uno sbilanciamento capacitivo ΔC_s .

10 La figura 3, in cui del sensore MEMS 1 è illustrato un equivalente elettrico semplificato, mostra un circuito di lettura 10, del tipo descritto nell'articolo citato.

In particolare, il sensore MEMS 1 è schematizzato
15 mediante un primo e un secondo condensatore di lettura equivalente 11, 12, aventi primi terminali collegati a un primo e, rispettivamente, un secondo nodo di lettura 13, 14 e secondi terminali collegati a un nodo comune 15. Inoltre, il primo e il secondo condensatore di lettura
20 equivalente 11, 12 hanno capacità pari alla prima e, rispettivamente, alla seconda capacità di lettura C_1 , C_2 . Il primo e il secondo nodo di lettura 13, 14 sono collegati a tutti i primi bracci 5' e, rispettivamente, a tutti i secondi bracci 5" dello statore 3,
25 mentre il nodo comune 15 è collegato alla massa mobile

JONIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BM

4 e quindi ai bracci mobili 6. Inoltre, in figura 3 le capacità parassite del sensore MEMS 1 sono schematizzate mediante condensatori parassiti 17, 18 collegati fra i nodi di lettura 13, rispettivamente 14 e massa.

5 Il circuito di lettura 10 comprende un amplificatore operativo di lettura 20 in configurazione di integratore di carica e uno stadio di retroazione 21.

In dettaglio, l'amplificatore operativo di lettura 20, avente topologia completamente differenziale, 10 presenta un ingresso invertente collegato al primo nodo di lettura 13 e un ingresso non invertente collegato al secondo nodo di lettura 14; e ha un'uscita non invertente 20a e un'uscita invertente 20b fra le quali è presente una tensione di uscita V_o . Inoltre, un primo e 15 un secondo condensatore di integrazione 22, 23, aventi uguale capacità di integrazione C_i , sono collegati l'uno fra l'ingresso invertente e l'uscita non invertente 20a e l'altro fra l'ingresso non invertente e l'uscita invertente 20b dell'amplificatore operativo di lettura 20. 20

Lo stadio di retroazione 21 comprende un circuito amplificatore 25 e un primo e un secondo condensatore di retroazione 26, 27, aventi primi terminali collegati a un'uscita 25a del circuito amplificatore 25 e secondi 25 terminali collegati al primo e, rispettivamente, al se-

JORIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BW

condo nodo di lettura 13, 14. Il circuito amplificatore 25, la cui struttura e il cui funzionamento sono descritti in dettaglio nell'articolo citato, è un circuito a condensatori commutati presentante un primo e un secondo ingresso differenziale 25b, 25c, collegati all'ingresso invertente e, rispettivamente, all'ingresso non invertente dell'amplificatore operativo di lettura 20, e un ingresso di riferimento, collegato a un generatore di tensione 29 fornente una prima tensione di riferimento V_{r1} . In pratica, il circuito amplificatore 25 rileva, in una prima fase di funzionamento, la tensione presente fra gli ingressi differenziali 25b, 25c, ne determina il valor medio e, in una seconda fase, genera in uscita una tensione di retroazione V_{FB} proporzionale alla differenza fra tale valor medio e la prima tensione di riferimento V_{r1} .

La lettura del sensore MEMS 1 viene eseguita fornendo alla massa mobile 4 una tensione di lettura V_s a onda quadra. Lo stadio di retroazione 20 interviene in modo da mantenere il primo e il secondo nodo di lettura 13, 14 a una tensione costante. In particolare, la tensione di retroazione V_{FB} fornita del circuito amplificatore 25 è un'onda quadra in controfase rispetto alla tensione di lettura V_s . In questo modo, i condensatori parassiti 17, 18 sono ininfluenti, in quanto sono man-

JORIO Paolo
Fascicolo n° 294/BM

tenuti a tensione costante e non assorbono carica, e quindi viene eliminato l'errore dovuto alle capacità parassite del sensore MEMS 1. La tensione di uscita V_o presente fra le uscite 20a, 20b dell'amplificatore operativo di lettura 20 è infatti data dall'espressione:

$$V_o = 2V_s \frac{\Delta C_s}{C_i} \quad (4)$$

in cui, come accennato in precedenza, ΔC_s è lo sbilanciamento capacitivo del sensore MEMS 1, ossia la variazione di capacità del primo e del secondo condensatore equivalente di lettura 11, 12 in seguito a spostamenti della massa mobile 4.

La precisione del circuito di lettura descritto, però, è limitata da un altro problema, causato da movimenti spuri, non coerenti cioè con il grado di libertà consentito e dovuti alla non idealità dei vincoli meccanici.

Più in dettaglio, supponendo per semplicità che le distanze X_1 , X_2 siano inizialmente uguali e pari a una distanza a riposo X_0 , dalle equazioni (1)-(3) risulta che la componente ΔC_{sx} dello sbilanciamento capacitivo ΔC_s secondo il primo asse di riferimento X è data dall'espressione:

$$\Delta C_{sx} = -\frac{dC_s}{dX} \Delta X = \frac{\epsilon A}{X_0^2} \Delta X = \frac{C_s}{X_0} \Delta X \quad (5)$$



dove ΔX è lo spostamento della massa mobile 4 lungo il primo asse di riferimento X.

In presenza di uno spostamento spurio ΔY parallelo al secondo asse di riferimento Y, lo sbilanciamento capacitivo ΔC_s presenta una componente ΔC_{sy} data dall'espressione:

$$\Delta C_{sy} = -\frac{dC_s}{dY} \Delta Y = -\frac{\epsilon L_y}{X_0} \Delta Y = -\frac{C_s}{L_y} \Delta Y \quad (6)$$

Eventuali spostamenti spuri ΔZ lungo il terzo asse di riferimento Z sono invece compensati grazie alla simmetria assiale del sensore MEMS 1.

Mentre lo sbilanciamento introdotto dallo spostamento ΔX è di tipo differenziale ed è di per sé adatto a essere rilevato dall'amplificatore operazionale di lettura 20, che ha topologia completamente differenziale, lo spostamento ΔY introduce una sensibile variazione di modo comune della capacità di lettura comune C_s , in quanto causa una variazione dell'area di affaccio A (figura 2).

Dato che la tensione di uscita V_o è direttamente proporzionale allo sbilanciamento capacitivo ΔC_s , che è a sua volta direttamente proporzionale alla capacità di lettura comune C_s , la variazione di modo comune dovuta allo spostamento ΔY introduce un significativo errore di lettura.

Scopo della presente invenzione è superare gli inconvenienti descritti.

Secondo la presente invenzione vengono realizzati un metodo di compensazione di capacità parassite in un sensore micro-elettro-meccanico, un metodo ed un circuito di rilevamento di spostamenti tramite sensori micro-elettro-meccanici, come definiti rispettivamente nelle rivendicazioni 1, 10 e 11.

Per una migliore comprensione dell'invenzione, ne vengono ora descritte due forme di realizzazione, a puro titolo di esempio non limitativo e con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la figura 1 è una vista prospettica di un sensore micro-elettro-meccanico;
- la figura 2 è una vista prospettica di un dettaglio del sensore di figura 1, ingrandito;
- la figura 3 è uno schema circuitale semplificato di circuito di lettura per un sensore micro-elettro-meccanico, di tipo noto;
- la figura 4 è uno schema circuitale di un circuito di lettura per un sensore micro-elettro-meccanico secondo una prima forma di realizzazione della presente invenzione;
- la figura 5 è un grafico relativo a grandezze presenti nel circuito di figura 4; e

JORIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BMI

- la figura 6 è uno schema circuitale di un circuito di lettura per un sensore micro-elettro-meccanico in una seconda forma di realizzazione della presente invenzione.

- 5 In figura 4, in cui parti uguali a quelle già mostrate sono indicate con gli stessi numeri di riferimento, è illustrato un circuito di lettura 30 che si differenzia dal circuito di lettura 10 di figura 3 per il fatto di comprendere uno stadio di compensazione 31.
- 10 In particolare, il circuito di lettura 30 è collegato al sensore MEMS 1 (qui schematizzato mediante il primo e il secondo condensatore di lettura equivalente 11, 12, collegati l'uno fra il primo nodo di lettura 13 e il nodo comune 15 e l'altro fra il secondo nodo di lettura 14 e il nodo comune 15) e comprende l'amplificatore
- 15 operativo di lettura 20 e lo stadio di retroazione 21. Inoltre, un generatore di segnale 60 è collegato ad un primo ingresso 61a di un selettore 61, di tipo noto, avente un secondo ingresso 61b ed un'uscita 61c.
- 20 L'uscita 61c è collegata al nodo comune 15.

Come già accennato, l'amplificatore operativo di lettura 20, avente topologia completamente differenziale, opera in configurazione di integratore di carica e presenta ingresso invertente collegato al primo nodo

25 di lettura 13 e ingresso non invertente collegato al

JORIO Paolo
(iscrittione Albo nr 294/BM)

secondo nodo di lettura 14. Lo stadio di retroazione
comprende il circuito amplificatore 25, avente gli in-
gressi differenziali 25b, 25c collegati agli ingressi
invertente e, rispettivamente, non invertente dell'am-
plificatore operativo di lettura 20; e il primo e il
secondo condensatore di retroazione 26, 27 collegati
l'uno fra l'uscita 25a del circuito amplificatore 25 e
il primo nodo di lettura 13 e l'altro fra l'uscita 25a
del circuito amplificatore 25 e il secondo nodo di let-
tura 14.

Lo stadio di compensazione 31 presenta un ingres-
so, collegato all'uscita 25a del circuito amplificatore
25, e un'uscita 31a, collegata al secondo ingresso 61b
del selettore 61 e fornente una tensione di compensa-
zione V_c , legata alla capacità di lettura comune C_s del
sensore MEMS 1 da una relazione approssimata di propor-
zionalità inversa, come spiegato in dettaglio più avan-
ti.

Lo stadio di compensazione 31 comprende un conden-
satore di memoria 32, uno stadio di disaccoppiamento 34
e un amplificatore operativo di compensazione 35 con
guadagno negativo.

Il condensatore di memoria 32 presenta un primo
terminale collegato a massa e un secondo terminale col-
legato all'uscita 25a del circuito amplificatore 25 me-

IONIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BM



diante un primo interruttore 36 e allo stadio di disaccoppiamento 33, mediante un secondo interruttore 37, comandato in controfase rispetto al primo interruttore 36.

5 Lo stadio di disaccoppiamento 33 è preferibilmente formato da un amplificatore operazionale in configurazione di inseguitore, ossia avente ingresso non invertente collegato al secondo interruttore 37 e ingresso invertente direttamente collegato all'uscita.

10 L'amplificatore operazionale di compensazione 35, in configurazione di amplificatore invertente, presenta terminale invertente collegato all'uscita dello stadio di disaccoppiamento 33 attraverso un resistore di ingresso 40, terminale non invertente collegato a massa e
15 uscita formante l'uscita dello stadio di compensazione 31 e fornente la tensione di compensazione V_c ; inoltre, l'uscita e il terminale invertente dell'amplificatore operazionale di compensazione 35 sono fra loro collegati mediante un resistore di retroazione 41.

20 Verrà ora mostrato che la relazione fra la capacità di lettura comune C_s è legata, in prima approssimazione, alla tensione di compensazione V_c tramite una relazione di proporzionalità inversa.

Infatti, quando alla massa mobile 4 viene fornita
25 la tensione di lettura V_s , la tensione di retroazione

una seconda costante.

Pertanto, linearizzando l'andamento della tensione di compensazione V_c nell'intorno I si commette un errore trascurabile e si può correttamente considerare va-

5 valida la relazione:

$$V_c = V_c' = K_2 / C_s \quad (10)$$

In pratica, un ciclo di lettura del sensore MEMS 1 viene effettuato nel seguente modo.

Inizialmente il selettore 61 fornisce, alla massa
10 mobile 4 (rappresentata in figura 4 dal nodo comune 15), la tensione costante V_s . Secondo quanto descritto in dettaglio nell'articolo citato, in questa fase il circuito amplificatore 25 dello stadio di retroazione 21 genera in uscita un valore della tensione di retro-
15 azione V_{FB} tale da mantenere costante la tensione di modo comune fra il primo e il secondo nodo di lettura 13, 14 (ossia la media fra le tensioni presenti sul ta-
li nodi); inoltre, dato che l'amplificatore operaziona-
le di lettura 20 mantiene sostanzialmente nulla la ten-
20 sione esistente fra i propri ingressi, il primo e il secondo nodo di lettura 13, 14 sono in pratica punti di massa virtuale.

Contemporaneamente, il primo interruttore 36 dello stadio di compensazione 31 viene chiuso (mentre il se-
25 condo interruttore 37 rimane aperto) e il condensatore

JORIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BAM

di memoria 32 si carica alla tensione di retroazione V_{FB} , che viene così memorizzata. In questa fase, in pratica, la capacità di lettura comune C_s (proporzionale alla tensione di retroazione V_{FB}) viene rilevata e quindi memorizzata per essere successivamente elaborata.

In seguito, gli interruttori 36, 37 commutano, in modo da collegare il condensatore di memoria 32 all'amplificatore operativo di compensazione 35, attraverso lo stadio di disaccoppiamento 33 e il resistore di ingresso 40. Pertanto, l'uscita 31a dello stadio di compensazione si porta e si mantiene sostanzialmente alla tensione di compensazione V_c indicata dall'equazione (10).

Inoltre, commuta il selettore 61; di conseguenza la tensione di compensazione V_c viene alimentata al nodo comune 15 (cioè alla massa mobile 4). In questa fase, la tensione di uscita V_o è data dalla seguente relazione:

$$V_o = 2 \frac{K_2 \Delta C_s}{C_i C_s} \quad (11)$$

Poiché, in base alle equazioni (5), (6), lo sbilanciamento capacitivo ΔC_s è dato da:

$$\Delta C_s = \Delta C_{sx} + \Delta C_{sy} = C_s \left(\frac{\Delta X}{X_0} - \frac{\Delta Y}{L_y} \right) \cong C_s \frac{\Delta X}{X_0} \quad (12)$$

la tensione di uscita V_o risulta sostanzialmente indipendente dalla capacità di lettura comune C_s . Infatti,

JORIO Paolo
Brevetto n° 294/BMI
Iscrizione Albo n° 294/BMI



combinando le equazioni (11) e (12) si ottiene:

$$V_o = 2 \frac{K_2 \Delta X}{C_i X_0} \quad (13)$$

L'approssimazione compiuta nell'equazione (12) è giustificata in quanto gli spostamenti spuri ΔY , dovuti
5 a imperfezioni costruttive e completamente assenti nel caso di vincoli ideali, sono molto minori degli spostamenti ΔX , che sono invece previsti per il normale funzionamento del sensore MEMS 1; inoltre, le grandezze X_0 e L_y sono fra loro confrontabili.

10 In pratica, la dipendenza della tensione di uscita V_o dalla capacità di lettura comune C_s che, in prima approssimazione segue una relazione di proporzionalità diretta, viene eliminata generando una tensione inversamente proporzionale alla capacità di lettura comune
15 C_s stessa e alimentando poi la tensione così generata alla massa mobile 4.

In figura 6, in cui parti uguali a quelle già mostrate sono indicate con gli stessi numeri di riferimento, è illustrata una seconda forma di realizzazione
20 dell'invenzione. In particolare, un circuito di lettura 40 comprende l'amplificatore operazionale di lettura 20 e lo stadio di retroazione 21 collegati fra loro e al sensore MEMS 1 come già descritto con riferimento alle figure 3 e 4. Inoltre, uno stadio di compensazione 41
25 comprende il condensatore di memoria 32, collegato al-

IONIO Pado
Iscrizione Albo nr. 294/BMI

l'uscita 25a del circuito amplificatore 25 attraverso il primo interruttore 36, e un amplificatore operazionale di compensazione 42, avente ingresso non invertente collegato a massa, ingresso invertente collegato attraverso un resistore di ingresso 43 a un generatore di tensione 44, fornente una seconda tensione di riferimento V_{r2} costante, e uscita formante un'uscita 41a dello stadio di compensazione 41. Inoltre, fra l'uscita e l'ingresso invertente dell'amplificatore operazionale di compensazione 42 è collegato un elemento resistivo di retroazione 45 a resistenza variabile, avente un terminale di controllo 45a collegato al condensatore di memoria 32 attraverso il secondo interruttore 37 per ricevere la tensione di retroazione V_{FB} memorizzata.

L'elemento resistivo di retroazione 45 comprende preferibilmente un transistor MOS operante in zona lineare, il cui terminale di porta forma il terminale di controllo 45a.

In questo caso, in pratica, la tensione di compensazione V_c viene controllata modulando il valore del guadagno G' attraverso la tensione di retroazione V_{FB} . Indicando con R_1 e R_2 la resistenza del resistore di ingresso 43 e, rispettivamente, dell'elemento resistivo di retroazione 45, il guadagno G' è dato dall'espressione:

$$G' = -R2/R1 \quad (14)$$

Inoltre:

$$Vc \doteq G' Vr2 = -G' (R2/R1) Vr2 \quad (15)$$

Dato che, in prima approssimazione, la resistenza di un transistor MOS diminuisce al crescere della tensione porta-sorgente in modo inversamente proporzionale e viceversa, la resistenza R2 dell'elemento resistivo di retroazione 45 è inversamente proporzionale alla tensione di retroazione V_{FB} . Inoltre, dato che, come mostrato in precedenza, la tensione di retroazione V_{FB} è direttamente proporzionale alla capacità di lettura comune Cs, dall'equazione (15) discende che, anche in questo caso, la tensione di compensazione è legata alla capacità di lettura comune Cs sostanzialmente da una legge di proporzionalità inversa.

Da quanto sopra esposto risulta evidente che l'invenzione permette vantaggiosamente di eliminare gli effetti di disturbo sia delle capacità parassite, sia dei movimenti spuri causati da imperfezioni meccaniche dei sensori MEMS. Di conseguenza, il circuito di lettura descritto è molto più preciso e meno soggetto a errori rispetto ai circuiti di lettura tradizionali.

Inoltre, il metodo e il circuito descritti sono estremamente versatili e possono essere utilizzati per la lettura di sensori MEMS a sbilanciamento capacitivo

JORIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BM

differenziale di qualsiasi tipo. In particolare, oltre ai sensori lineari a variazione di interspazio, è possibile leggere sensori di tipo rotazionale e del tipo a variazione di area di affaccio.

5 Risulta infine evidente che al metodo e il circuito descritti possono essere apportate modifiche e varianti, senza uscire dall'ambito della presente invenzione.

10 In particolare, lo stadio di compensazione può essere realizzato in modi differenti e fornire una tensione di compensazione che rappresenta una approssimazione diversa da quella descritta; lo stadio di compensazione potrebbe, ad esempio, essere realizzato mediante circuiti a condensatori commutati.

JORIO Paolo
Iscrizioni Albo n° 294/BM



R I V E N D I C A Z I O N I

1. Metodo di compensazione di capacità parassite in un sensore micro-elettro-meccanico comprendente un corpo fisso (3) e una massa mobile (4), formanti almeno un primo e un secondo condensatore di lettura (11, 12), collegati a un nodo comune (15) e a un primo, rispettivamente un secondo nodo di lettura (13, 14) e presentanti una capacità di lettura comune a riposo (C_s); il metodo comprendendo le fasi di:

- fornire a detto nodo comune (15) una tensione di lettura (V_s); e

- mantenere detti primo e secondo nodo di lettura (13, 14) a una tensione di modo comune costante tramite una tensione di retroazione (V_{FB});

caratterizzato dal fatto di comprendere le fasi di:

- fornire a detto nodo comune (15) una grandezza elettrica di compensazione (V_c), inversamente proporzionale a detta capacità di lettura comune (C_s) almeno in un prefissato intervallo (I).

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto di comprendere, inoltre, la fase di misurare detta capacità di lettura comune (C_s).

3. Metodo secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che detta fase di misurare comprende le

JORIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BMI

fasi di:

- rilevare detta tensione di retroazione (V_{FB}); e
- memorizzare detta tensione di retroazione (V_{FB}).

4. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 3, caratterizzato dal fatto di comprendere la fase di generare detta grandezza elettrica di compensazione (V_c) in modo, in prima approssimazione e in detto intervallo (I), inversamente proporzionale a detta capacità di lettura comune (C_s).

5. Metodo secondo la rivendicazione 4, caratterizzato dal fatto che detta fase di generare detta grandezza elettrica di compensazione (V_c) comprende amplificare detta tensione di retroazione (V_{FB}) con guadagno negativo (G).

6. Metodo secondo la rivendicazione 4, caratterizzato dal fatto che detta fase di generare detta grandezza elettrica di compensazione (V_c) comprende le fasi di:

- fornire mezzi amplificatori (42, 43, 45) aventi un guadagno variabile (G);
- controllare detto guadagno variabile (G) mediante detta tensione di retroazione (V_{FB}).

7. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di comprendere la fase di fornire detta tensione di retroazione

JORIO Paolo
Iscrizione Albo nr 294/BM

(V_{FB}) a detti primo e secondo nodo di lettura (13, 14) attraverso un primo e, rispettivamente, un secondo condensatore di retroazione (26).

8. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detta tensione di lettura (V_s) è una tensione costante di durata prefissata.

9. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che, prima di eseguire detta fase di fornire una grandezza elettrica di compensazione (V_c), viene eseguita la fase di rimuovere detta tensione di lettura (V_s) da detto nodo comune (15).

10. Metodo di rilevamento di uno spostamento di un sensore micro-elettro-meccanico comprendente un corpo fisso (3) e una massa mobile (4), formanti almeno un primo e un secondo condensatore di lettura (11, 12), collegati a un nodo comune (15) e a un primo, rispettivamente un secondo nodo di lettura (13, 14) e presentanti una capacità di lettura comune a riposo (C_s) ed sbilanciamento capacitivo (ΔC_s) in seguito ad uno spostamento di detta massa mobile; il metodo comprendendo le fasi di:

- fornire a detto nodo comune (15) una tensione di lettura (V_s);

- mantenere detti primo e secondo nodo di lettura (13, 14) a una tensione di modo comune costante tramite una tensione di retroazione (V_{FB}); e

- rilevare una grandezza di uscita (V_o) correlata a detto sbilanciamento capacitivo (ΔC_s),

caratterizzato dal fatto di comprendere le fasi di:

- fornire a detto nodo comune (15) una grandezza elettrica di compensazione (V_c), inversamente proporzionale a detta capacità di lettura comune (C_s) almeno in un prefissato intervallo (I).

11. Circuito di rilevamento di spostamenti tramite un sensore micro-elettro-meccanico, comprendente un corpo fisso (3) e una massa mobile (4), formanti almeno un primo e un secondo condensatore di lettura (11, 12), collegati a un nodo comune (15) e a un primo, rispettivamente un secondo nodo di lettura (13, 14) e presentanti una capacità di lettura comune (C_s) a riposo; il circuito comprendendo:

- mezzi amplificatori di lettura (20), aventi ingressi (13, 14) collegati a detti primo e, rispettivamente, secondo condensatore di lettura (11, 12) un'uscita fornente una tensione di uscita (V_o) correlata a una tensione presente su detto nodo comune (15); e

- uno stadio di retroazione (21), collegato a detto

JORIO Pado
Iscrizione Albo nr 294/BMI



ti primo e secondo nodo di lettura (13, 14) e generante una tensione di retroazione (V_{FB}) mantenente detti primo e secondo nodo di lettura (13, 14) a una tensione di modo comune costante;

caratterizzato dal fatto di comprendere uno stadio di compensazione (31; 41) ricevente detta tensione di retroazione (V_{FB}) e fornente a detto nodo comune (15) una tensione di compensazione (V_c), inversamente proporzionale a detta capacità di lettura comune (C_s) almeno in un prefissato intervallo (I).

12. Circuito secondo la rivendicazione 11, caratterizzato dal fatto che detto stadio di compensazione (31; 41, 43, 45) comprende mezzi di memoria (32), collegati a detto stadio di retroazione (21) e memorizzanti detta tensione di retroazione (V_{FB}) e un amplificatore lineare (35; 42) collegato a detti mezzi di memoria ed aventi guadagno (G) negativo.

13. Circuito secondo la rivendicazione 12, caratterizzato dal fatto che detto amplificatore lineare (35) comprende un amplificatore operazionale in configurazione invertente, avente ingresso invertente collegato a detti mezzi di memoria (32), ingresso non invertente collegato ad una linea a potenziale di riferimento e uscita collegata a detto nodo comune (15).

14. Circuito secondo la rivendicazione 12, carat-

JORIO Poggi
Iscrizione Albo nr. 294/BMI

terizzato dal fatto che detto amplificatore lineare (42, 43, 45) è un amplificatore lineare a guadagno controllabile (G).

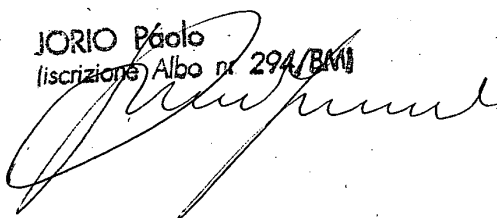
15. Circuito secondo la rivendicazione 14, caratterizzato dal fatto che detto amplificatore lineare (42, 43, 45) comprende un elemento resistivo a resistenza variabile (45), avente un terminale di controllo (45) collegato a detti mezzi di memoria (32).

16. Circuito secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che detto amplificatore lineare (42, 43, 45) comprende, inoltre, un amplificatore operazionale (42) avente ingresso invertente collegato a un generatore di tensione di riferimento, fornente una tensione di riferimento costante (V_{r2}), ingresso non invertente collegato a una linea a potenziale di riferimento e uscita collegata a detto nodo comune (15).

17. Metodo e circuito di rilevamento di spostamenti tramite un sensore micro-elettro-meccanico, sostanzialmente come descritto con riferimento alle figure annesse.

p.i.: STMICROELECTRONICS S.R.L.

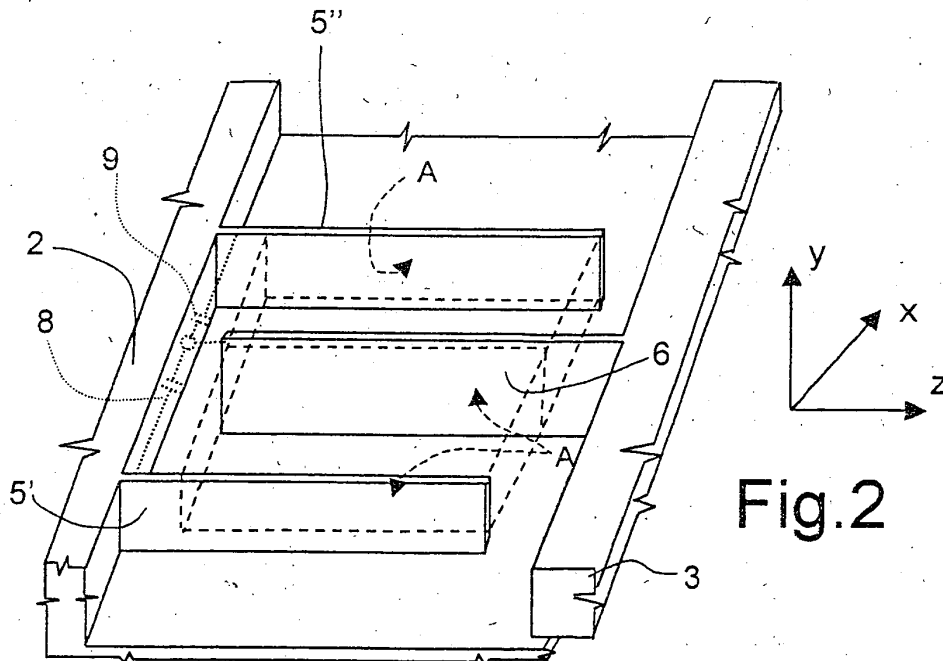
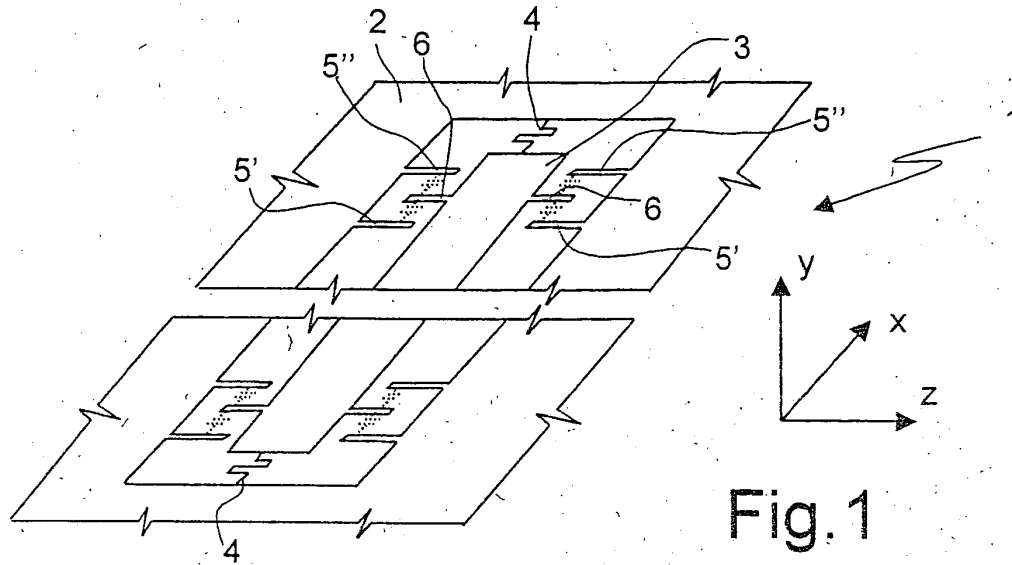
JORIO Paolo
(iscrizione Albo n° 294/BMI)



JORIO Paolo
(iscrizione Albo n° 294/BMI)



10 2001A 000157



p.i.: STMICROELECTRONICS S.R.L.

JORIO Paolo
 Iscrizione Albo nr 294/BAI

C.C.I.A.A.
 Torino

TO 2001A 000 1571

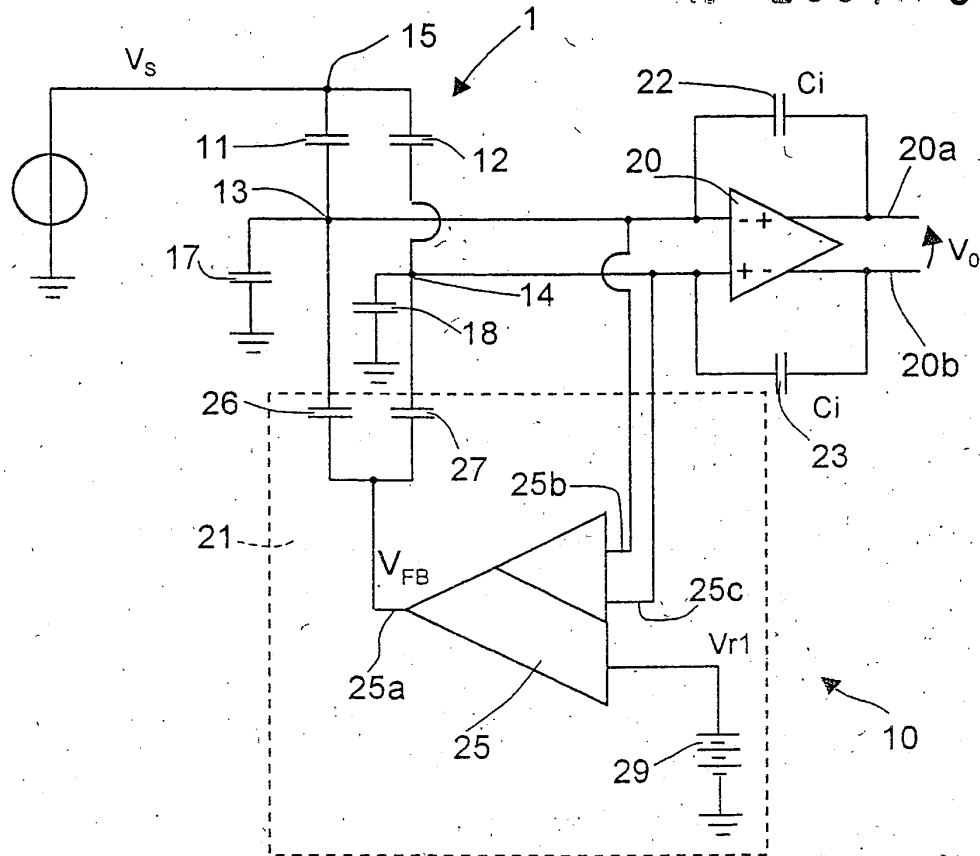


Fig.3

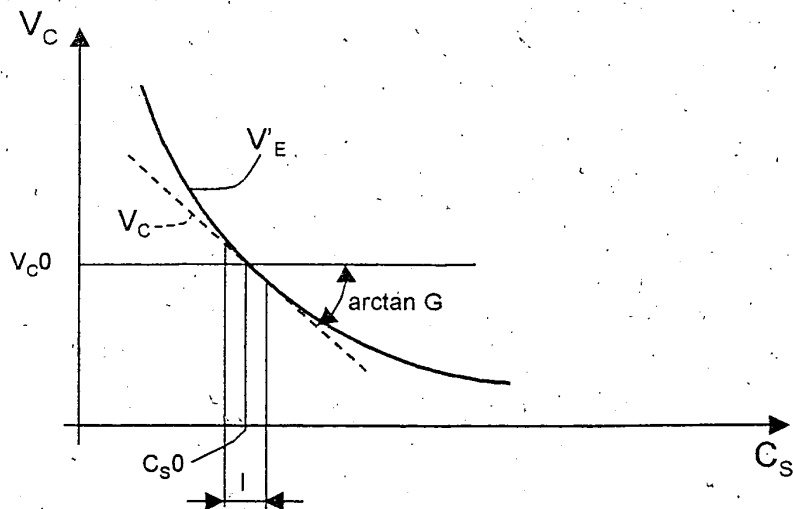


Fig.5



p.i.: STMICROELECTRONICS S.R.L.

JORIO Paolo
(iscrizione Albo nr 294/BMI)

C.C.I.A.A.
Torino

TO 2001A 000 15.7

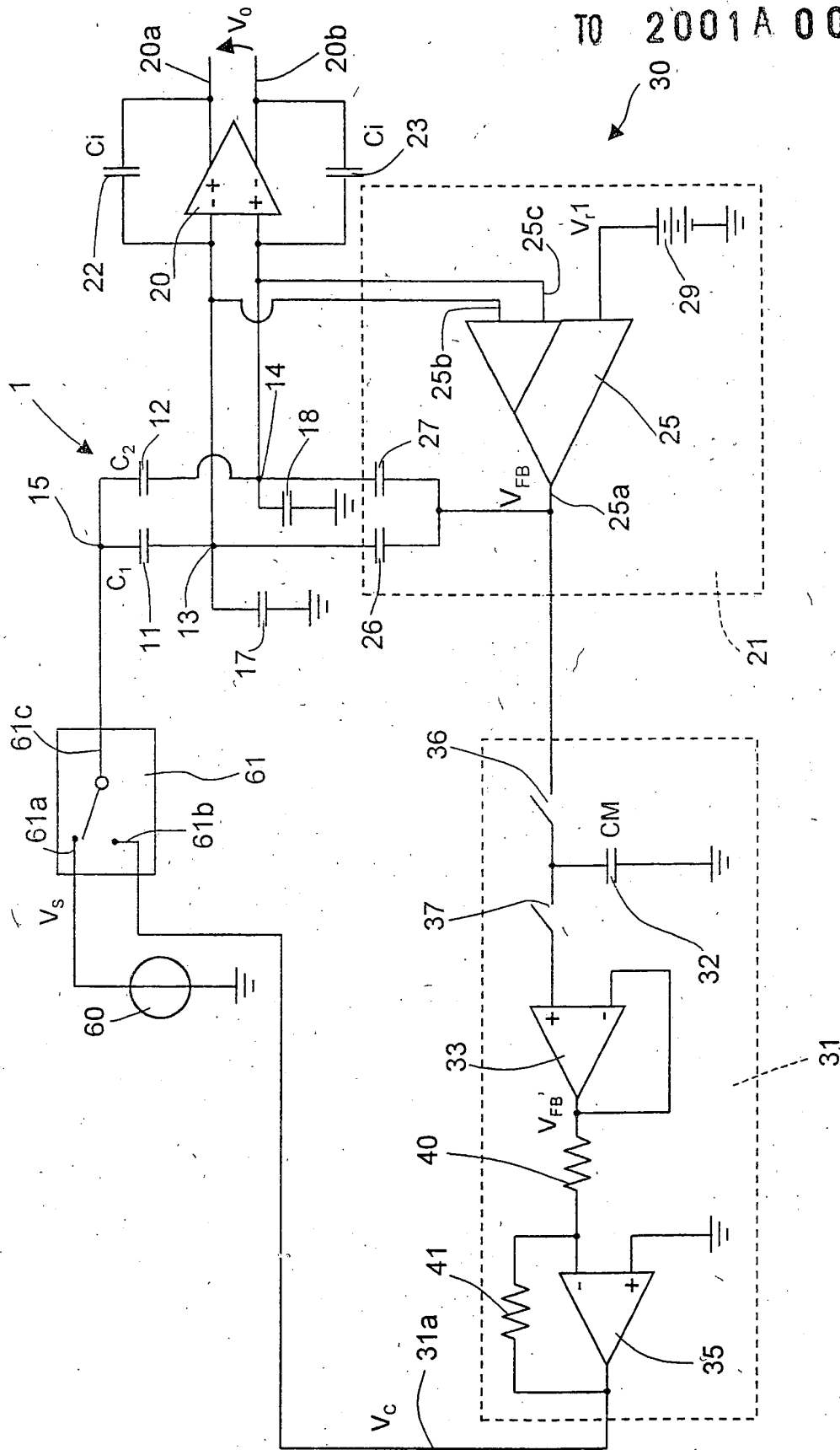


Fig.4

2001A 000 15.7

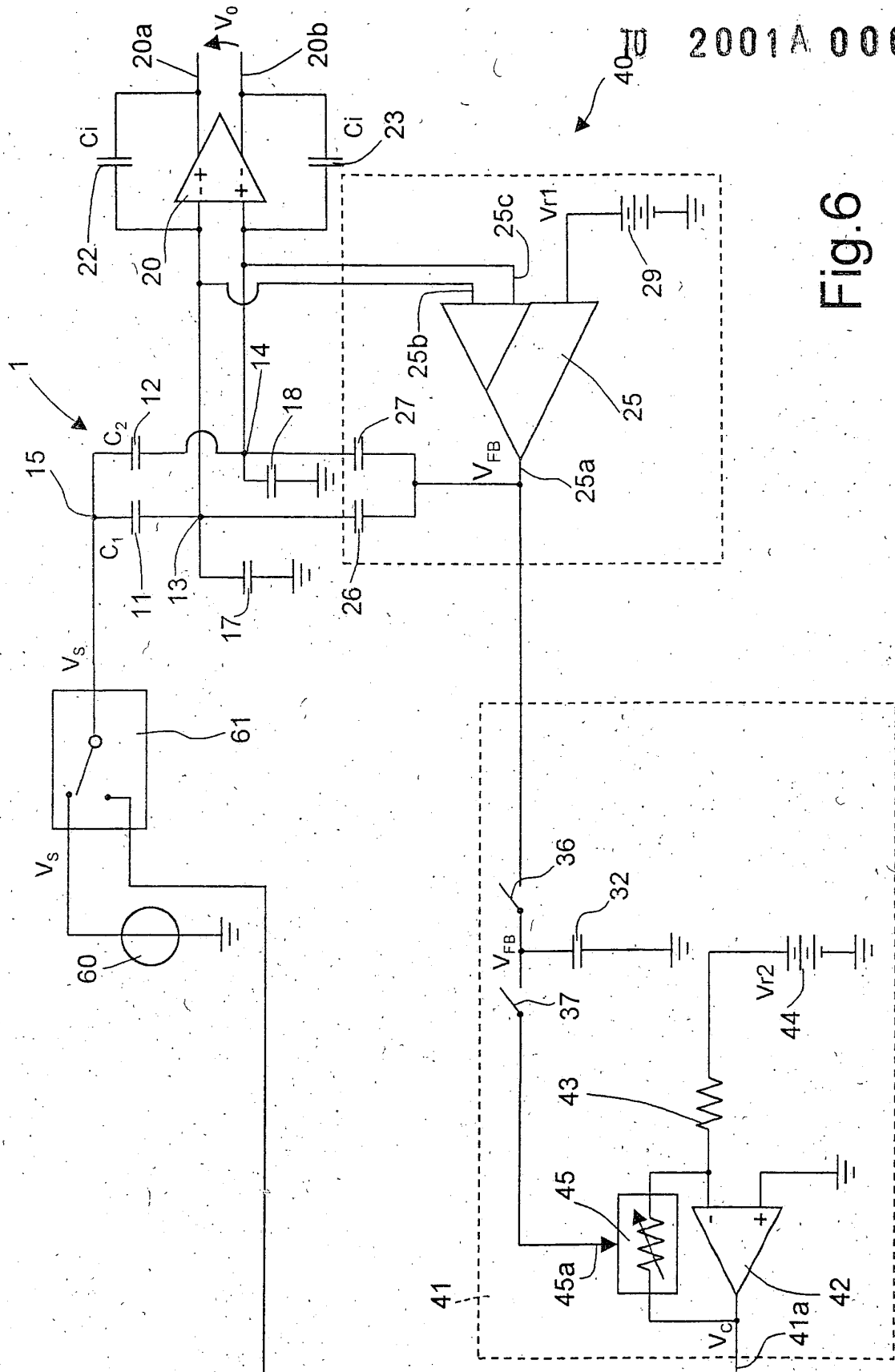


Fig.6

THIS PAGE BLANK (USPTO